

考虑电压动态过程的含电网换相换流器的高压直流输电小信号建模方法

李至峪¹, 李欢², 魏伟², 刘崇茹¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市昌平区 102206;

2. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广东省广州市 510663)

LCC-HVDC Small Signal Modeling Method Considering Voltage Variation

LI Zhiyu¹, LI Huan², WEI Wei², LIU Chongru¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, Guangdong Province, China)

摘要: 对含电网换相换流器的高压直流输电(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)系统进行小信号稳定性分析时, 存在小信号模型精度低、分析结果无法为系统稳定运行提供参考的问题。因此, 提出一种计及电压动态过程的小信号建模方法。对 LCC-HVDC 状态空间模型进行改进, 修正了逆变侧换流站内部的角度关系与换相角表达式, 在模型中引入考虑电压动态过程的状态方程, 并基于此模型计算系统运行的控制参数稳定域。通过 PSCAD 电磁暂态仿真软件对模型进行验证, 并与传统小信号模型作对比, 结果表明建立的考虑电压动态过程的小信号模型精度高, 小信号稳定性分析结果更准确。

关键词: 高压直流输电; 小信号模型; 电压变化; 换流站模型; 稳定域

Abstract: In the analysis on small signal stability of line commutated converter high voltage direct current (abbr. LCC-HVDC) power transmission system, there were such shortages as low accuracy of small signal model and the analysis result could not provide reference for stable operation of power transmission. For this reason, a small signal modeling method, which took dynamic process of voltage into account, was proposed to improve the state-space model of LCC-HVDC system and to revise the angle relationship inside the inverted side converter station as well as the expression of trigger angle. A new state equation considering the dynamic process of voltage was led in the model, and based on this model the stability domain of control parameters for system operation was calculated. The

proposed model was verified by PSCAD electromagnetic transient simulation and the obtained results were compared with that by traditional small signal model. Comparison results show that established small signal model possesses higher precision and the analysis results for small signal stability by the proposed model are of higher precision.

Keywords: HVDC transmission; small signal model; voltage variation; converter station model; stability region

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0116

0 引言

基于电网换相换流器的高压直流输电(line commutated converter high voltage direct current, LCC-HVDC)技术是解决远距离、大容量输电的有效手段^[1-2]。小干扰稳定性分析在 LCC-HVDC 的控制器参数选取、阻尼分析中得到了广泛应用, 而建立准确的小信号模型, 是进行小干扰稳定性分析的基础^[3]。目前大部分研究都采用线性化准稳态模型的方法得到小信号模型^[4]。为提高模型的适用性, 小信号模型都采用模块化建模思想, 先将系统划分成若干子系统分别建模, 再联立获得小信号模型, 这样大大降低了统一建模的复杂性, 也为分析子系统间的动态交互过程提供了可能^[5-8]。LCC-HVDC 系统小信号模型主要由直流输电线路、LCC 换流站与控制系统的小信号模型联立得到^[9-10]。LCC 换流站作为交直流系统的接口, 目前主要存在时域建模^[11-12]与频域建模^[13-14]2 种方法: 时域建模方法物理意义清晰, 适用于

基金项目: 南方电网公司科技项目(ZBKJXM20180104)
Project Supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid(ZBKJXM20180104)

交直流系统相互作用的分析；频域建模方法是将时域模型转换到频域，以考虑谐波耦合作用，可研究系统内部各次谐波动态耦合机理。同时为了将直流与交流系统建立联系，描述其外部特性，LCC 换流站普遍从输出电流矢量和直流电流角度建立小信号模型^[15]。

然而，现有模型普遍认为换相角公式在暂态过程中依然严格成立，这会导致模型计算结果不够准确，进行小信号稳定分析时可能会出现偏差，不利于系统稳定运行。针对上述问题，本文提出一种考虑电压动态过程的 LCC-HVDC 小信号建模方法，该方法具有建模简单的特点，使用该方法建立的 LCC-HVDC 小信号模型精度高，在进行小信号稳定分析时结果更准确。

该方法考虑换流站网侧电压的动态过程对小信号模型的影响，加入了新的状态变量与状态方程，修正了逆变换流站内部的角度关系，提高了准稳态模型的精度。

1 LCC-HVDC 状态空间模型

1.1 系统结构

本文采用基于晶闸管器件的 12 脉动 LCC 换流器开展研究，整体结构如图 1 所示。其中：各变量下标“r”代表整流侧，“i”代表逆变侧； E_{ac} 为换流站换流母线电压有效值； k 为换流变压器变比； X_c 为换流变压器的等效换相电抗；直流输电线路采用 T 形等效电路， L 为直流线路的等效电抗； R 代表直流线路等效电阻； C 是直流线路等效对地电容； I_d 为直流电流，正方向如图 1 箭头所示。

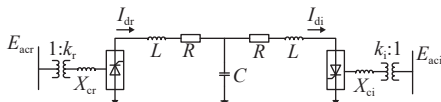


图 1 LCC-HVDC 输电系统结构
Fig. 1 Structure of LCC-HVDC transmission system

1.2 直流系统准稳态模型

1.2.1 直流线路

图 1 中，直流线路采用集总参数模型，根据基尔霍夫电压定律得到直流线路的准稳态模型为^[9]

$$\begin{cases} LI_{dr} = V_{dr} - V_c - RI_{dr} \\ LI_{di} = V_c - V_{di} - RI_{di} \\ CV_d = I_{dr} - I_{di} \end{cases} \quad (1)$$

式中： V_{dr} 、 V_{di} 分别为整流站与逆变站出口的直流电压； V_c 为直流线路等效电容电压。

1.2.2 换流站

准稳态模型主要考虑基波分量，方程中各量是在一个工频对应周期内的平均值，整流侧方程为^[16]

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}nk_rE_{acr}\cos\alpha_r - \frac{3}{\pi}nX_{cr}I_{dr} \\ P_{dr} = V_{dr}I_{dr} \\ Q_{dr} = I_{dr}\sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}nk_rE_{acr}\right)^2 - V_{dr}^2} \\ \alpha_r = \alpha'_r + \theta_{acr} - \theta_{PLLr} \end{cases} \quad (2)$$

式中： n 为换流站串联换流桥数； α_r 为整流侧实际触发角； P_{dr} 、 Q_{dr} 为整流侧交流电网向换流站注入的有功、无功功率，以流入换流站为正方向； α'_r 为整流侧控制器输出的触发角指令值； θ_{acr} 为换流变压器网侧母线电压相位； θ_{PLLr} 为整流侧锁相环输出相位。

为便于系统建模，逆变侧方程用 γ 表示^[17]

$$\begin{cases} V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi}nk_iE_{aci}\cos\gamma - \frac{3}{\pi}nX_{ci}I_{di} \\ \alpha_i + \beta_i = \pi \\ \cos\gamma = \cos\beta_i + \frac{\sqrt{2}X_{ci}I_{di}}{k_iE_{aci}} = \\ -\cos\alpha_i + \frac{\sqrt{2}X_{ci}I_{di}}{k_iE_{aci}} \\ P_{di} = V_{di}I_{di} \\ Q_{di} = -I_{di}\sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}nk_iE_{aci}\right)^2 - V_{di}^2} \\ \alpha_i = \alpha'_i + \theta_{aci} - \theta_{PLL_i} \end{cases} \quad (3)$$

式中： γ 为逆变侧关断角； α_i 为逆变侧实际触发角； β_i 为逆变侧触发超前角； P_{di} 、 Q_{di} 为逆变侧交流电网向换流站注入的有功、无功功率，以流出换流站为正方向； α'_i 为逆变侧控制器输出的触发角指令值； θ_{aci} 为换流变压器网侧母线电压相位； θ_{PLL_i} 为逆变侧锁相环输出相位。

1.2.3 直流控制系统

LCC-HVDC 的直流控制系统主要由触发角控制器与锁相环控制器构成，其中触发角控制器主要由起滤波作用的一阶惯性环节与比例积分 (proportional integral, PI) 控制器组成。本文以整流侧采用定电流控制，逆变侧采用定关断角控制为例，建立直流控制系统的准稳态模型。

整流站采用定电流控制,其控制器结构如图2所示^[18]。

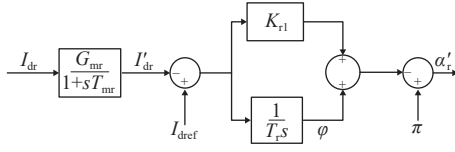


图2 定电流控制结构

Fig. 2 Structure of constant current control

相应的准稳态模型为

$$\begin{cases} T_{mr} \dot{I}'_{dr} = G_{mr} I_{dr} - I'_{dr} \\ \dot{\varphi} = \frac{1}{T_r} (I_{dref} - I'_{dr}) \\ \alpha'_r = \pi - \varphi - K_{r1} (I_{dref} - I'_{dr}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{dr} 为整流侧直流线路电流; I'_{dr} 为经一阶惯性环节滤波后的直流电流; T_{mr} 与 G_{mr} 分别为一阶惯性环节的时间常数与增益系数; I_{dref} 为定电流控制器的参考值; φ 为 PI 控制器中积分环节的输量; T_r 与 K_{r1} 分别为 PI 控制器的积分时间常数与比例增益; α'_r 为控制器输出的触发角指令值。

逆变站采用定关断角控制,其控制器结构如图3所示^[18]。

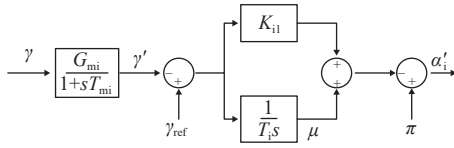


图3 定关断角控制结构

Fig. 3 Structure of constant extinction angle control

相应的准稳态模型为

$$\begin{cases} T_{mi} \dot{\gamma}' = G_{mi} \gamma - \gamma' \\ \dot{\mu} = \frac{1}{T_i} (\gamma_{ref} - \gamma') \\ \alpha'_i = \pi - \mu - K_{i1} (\gamma_{ref} - \gamma') \end{cases} \quad (5)$$

式中: γ 为逆变侧关断角; γ' 为经一阶惯性环节滤波后的关断角; T_{mi} 与 G_{mi} 分别为一阶惯性环节的时间常数与增益系数; γ_{ref} 为定关断角控制器的参考值,一般为 0.2618; μ 为 PI 控制器中积分环节的输量; T_i 与 K_{i1} 分别为 PI 控制器的积分时间常数与比例增益; α'_i 为控制器输出的触发角指令值。

锁相环装置通过测量换流母线电压相角的变化,经过一个负反馈信号通路产生换流站触发角的修正量,结构如图4所示^[19]。

相应的准稳态模型为

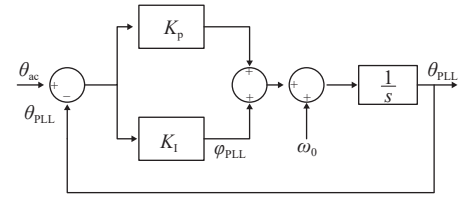


图4 锁相环结构

Fig. 4 Structure of PLL

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_{PLLr(i)} = K_{Ir(i)} (\theta_{acr(i)} - \theta_{PLLr(i)}) \\ \dot{\theta}_{PLLr(i)} = \varphi_{PLLr(i)} + K_{pr(i)} (\theta_{acr(i)} - \theta_{PLLr(i)}) \end{cases} \quad (6)$$

式中:下标 r 与 i 分别表示整流侧与逆变侧; φ_{PLL} 为锁相环 PI 控制器中积分环节的输量; θ_{ac} 为换流变压器网侧母线电压相位; ω_0 为换流变压器网侧母线电压角频率; K_p 与 K_i 分别为 PI 控制器比例增益与积分增益; θ_{PLLr} 为锁相环输出相位。

2 考虑电压动态过程的直流系统小信号模型

2.1 电压动态过程对小信号模型的影响

稳态运行时,换流站网侧电压不发生变化,以电压运行在 E_1 为例(见图5),A、B 两点之间表示半个周期,相角为 π ,即线电压 2 自然换相点之间的角度为 π ,此时 $\alpha + \beta = \pi$ 。

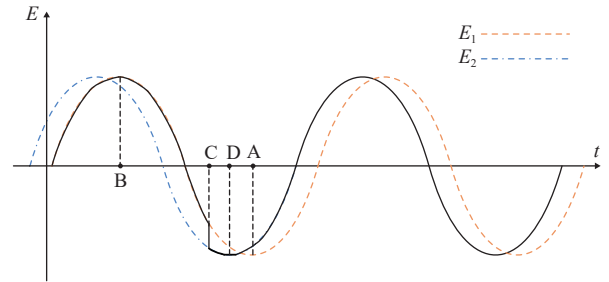


图5 电压动态过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of voltage variation

受到小干扰时,以系统电压开始运行在 E_1 状态,在 C 时刻系统受到小干扰电压开始变化,电压变化到 E_2 为例,此时 B、D 2 点之间表示电压的半个周期,由图可知,线电压 2 自然换相点之间的角度不等于 π ,式(3)中的第 2 式不再严格成立。

考虑电压动态过程对小信号模型带来的影响,定义同一线电压 2 自然换相点之间的角度与 π 的差 θ_π

$$\theta_\pi = \theta_{ac} - \theta_{ac} e^{-sT/2} \quad (7)$$

式中: θ_{ac} 为换流站网侧母线电压相角; T 是电压

周期，对于 50Hz 系统， $T=0.02\text{s}$ 。 θ_π 在稳态下为 0，在电压变化时满足 $\alpha+\beta+\theta_\pi=\pi$ 。

对式 (7) 中的延迟环节作帕德近似

$$\theta_\pi = \theta_{ac} - \theta_{ac} \frac{1-sT/4}{1+sT/4} = \frac{sT/2}{1+sT/4} \theta_{ac} \quad (8)$$

令 $\theta_{\pi 2}=\theta_{ac}-\theta_\pi/2$ 代入上式整理得：

$$\theta_{\pi 2} = \frac{1}{1+sT/4} \theta_{ac} \quad (9)$$

依据式 (9) 可以得到一个新的状态方程，其中 $T_\pi=T/4=0.005\text{s}$ 。

$$T_\pi \dot{\theta}_{\pi 2} = \theta_{ac} - \theta_{\pi 2} \quad (10)$$

考虑电压动态过程影响后的逆变侧关断角 γ 应为

$$\gamma = \arccos(\cos(\pi - \theta_\pi - \alpha) + \frac{\sqrt{2}X_{ci}I_{di}}{k_i E_{aci}}) \quad (11)$$

考虑电压动态过程对小信号模型带来的影响后，逆变侧换流站数学模型由式 (3) 更改为式 (12)：

$$\begin{cases} T_\pi \dot{\theta}_{\pi 2} = \theta_{ac} - \theta_{\pi 2} \\ V_{di} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} n k_i E_{aci} \cos \gamma - \frac{3}{\pi} n X_{ci} I_{di} \\ \alpha_i + \beta_i + \theta_\pi = \pi \\ \cos \gamma = \cos(\pi - \theta_\pi - \alpha) + \frac{\sqrt{2}X_{ci}I_{di}}{k_i E_{aci}} \\ P_{di} = V_{di} I_{di} \\ Q_{di} = -I_{di} \sqrt{\left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi} n k_i E_{aci}\right)^2 - V_{di}^2} \\ \alpha_i = \alpha'_i + \theta_{aci} - \theta_{PLL_i} \\ \theta_{\pi 2} = \theta_{ac} - \frac{\theta_\pi}{2} \end{cases} \quad (12)$$

2.2 考虑电压动态过程的 LCC-HVDC 小信号模型

考虑了电压动态过程对于换流站角度关系与换相角的影响，向原有小信号模型引入了新的状态变量后，式 (1) — (2)、式 (4) — (6) 与式 (12) 共同组成 LCC-HVDC 系统的状态空间模型。

将本文建立的状态空间模型联立化简后如式 (13) 所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{p} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \end{cases} \quad (13)$$

式中：状态变量 $\mathbf{x}=[I_{dr}, I_{dr}', \varphi, \varphi_{PLLr}, \theta_{PLLr}, I_{di}, \gamma', \mu, \varphi_{PLL_i}, \theta_{PLL_i}, \theta_{\pi 2}, V_{ci}]^T$ ；代数变量 $\mathbf{y}=[E_{acr}, \theta_{acr}, E_{aci}, \theta_{aci}]^T$ ；输入变量 $\mathbf{u}=[I_{dref}, \gamma_{dref}]^T$ ； $\mathbf{p}=[P_{dr}, Q_{dr}, P_{di}, Q_{di}]^T$ 。

线性化可得：

$$\begin{cases} \Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{B} \Delta \mathbf{y} + \mathbf{M} \Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{p} = \mathbf{C} \Delta \mathbf{x} + \mathbf{D} \Delta \mathbf{y} + \mathbf{N} \Delta \mathbf{u} \end{cases} \quad (14)$$

式中， $\mathbf{A}=\partial f/\partial \mathbf{x}|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}0}$ ， $\mathbf{B}=\partial f/\partial \mathbf{y}|_{\mathbf{y}=\mathbf{y}0}$ ， $\mathbf{C}=\partial g/\partial \mathbf{x}|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}0}$ ， $\mathbf{D}=\partial g/\partial \mathbf{y}|_{\mathbf{y}=\mathbf{y}0}$ ， $\mathbf{M}=\partial f/\partial \mathbf{u}|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}0}$ ， $\mathbf{N}=\partial g/\partial \mathbf{u}|_{\mathbf{u}=\mathbf{u}0}$ 。

交流侧潮流的功率方程为

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{y} \quad (15)$$

式中： $\mathbf{p}$ 为网络节点注入功率有功、无功； $\mathbf{y}$ 为节点电压幅值、相角。对于交流线路，矩阵 $\mathbf{J}$ 为对应的雅可比矩阵，可直接由潮流计算获得。

将式 (14)(15) 联立化简可得 LCC-HVDC 小信号模型：

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{A} - \mathbf{B}(\mathbf{D} - \mathbf{J})^{-1} \mathbf{C}] \Delta \mathbf{x} + [\mathbf{M} - \mathbf{B}(\mathbf{D} - \mathbf{J})^{-1} \mathbf{N}] \Delta \mathbf{u} \quad (16)$$

3 模型验证

3.1 小信号模型验证

为验证本文所建立的考虑电压动态过程的小信号模型的正确性及模型精确度的提升，在 PSCAD 中建立如图 1 所示的系统电磁暂态模型，系统在额定状态下运行至 10s 时，定电流控制器的参考值 I_{dref} 从 1.0 (标么值) 阶跃为 0.95 (标么值)，将电磁暂态仿真结果与传统小信号模型^[20](small signal model, SSM) 和本文建立的考虑电压动态过程的小信号模型 (small signal model considering voltage variation, SSM-CVV) 的计算结果进行对比，结果见图 6。

图 6 中的计算结果表明，本文建立的 SSM-CVV 比传统的 SSM 更接近 PSCAD 电磁暂态模型，对系统小干扰过程中的暂态过程描述更加准确。与电磁暂态模型相比，基于 SSM 模型的仿真曲线振荡频率略高、衰减速度明显更快。因此 SSM 模型容易得到偏“乐观”的小信号稳定性分析结果，这一点在后面的控制参数边界分析中也得到印证。

为了进一步验证本文建立的 SSM-CVV 模型的准确性，将 SSM 模型、SSM-CVV 模型的模态分析结果，以及 PSCAD 仿真结果曲线的 Prony 分析结果进行对比。由于 Prony 分析结果受拟合阶数大小影响，表 1 中仅列出了幅值较大，对系统影响明显的信号数据。由表 1 可知暂态过程中的主导振荡频率为 6.6 Hz。而在表 2 中，SSM 模型计算出的振荡频率 7.14 Hz，比实际振荡频率 6.6

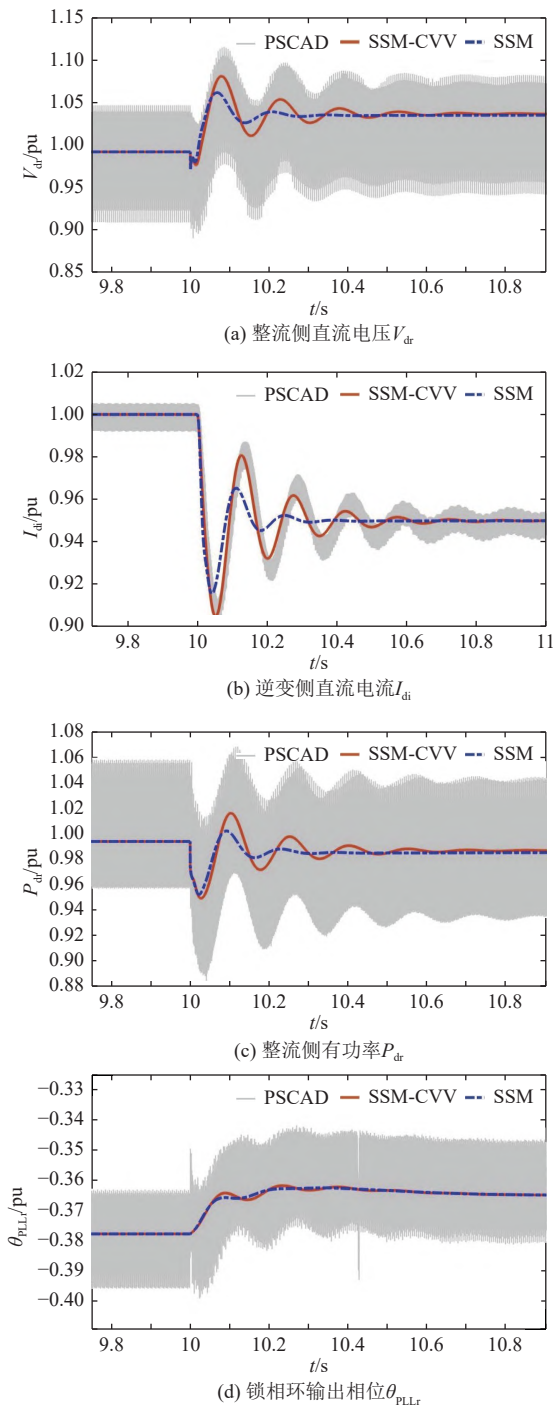


图 6 I_{dref} 阶跃时系统的动态响应

Fig. 6 Dynamic response of the system during the step of I_{dref}

Hz 大，相对误差为 8.1%。本文建立的 SSM-CVV 模型相比于 SSM 模型维数仅增加一阶，得到的 6.7 Hz 振荡频率计算结果与实际振荡频率更为接近，相对误差仅为 1.5%，模型精度更高。

3.2 模型对小干扰稳定性分析的影响

小信号模型是进行系统小信号稳定性分析的

表 1 电磁暂态仿真曲线的 Prony 分析部分结果

Table 1 Partial result of Prony analysis of electromagnetic transient simulation curve

模式	幅值/pu	频率/Hz
1直流	1.9	
2正弦	0.048	6.6
3直流	0.033	
4正弦	0.016	37
5直流	0.01	

表 2 系统特征值与振荡频率对比

Table 2 Comparison of system characteristic value and oscillation frequency

模型	特征值	频率/Hz
SSM	-1643.59+j0	
	-665.41+j0	
	-103.78±j264.02	42.02
	-188.76+j0	
	-13.80±j44.89	7.14
	-4.75±j4.70	0.75
SSM-CVV	-5.11±j5.10	0.81
	-2362.61+j0	
	-692.91+j0	
	-430.50+j0	
	-146.18±j238.01	37.89
	-77.34+j0	
	-6.48±j 42.12	6.70
	-4.75±j 4.69	0.75
	-5.11±j5.10	0.81

基础，本节采用根轨迹和主导模态分析方法，研究 SSM 与 SSM-CVV2 种模型对小信号稳定性分析的影响。

在相同的初始状态下，保持其他参数不变，逐渐减小逆变控制器积分时间常数 T_i ，2 种模型的主导模态根轨迹如图 7 所示。

由图 7 可知，随着时间常数 T_i 的逐渐减小，2 种模型计算的主导模态特征值都逐渐向靠近虚轴方向移动，即系统小信号稳定性随着 T_i 减小而降低。对于 SSM-CVV 模型，当 T_i 继续减小且小于 0.0161 时，系统的主导模态穿越虚轴，开始出现正的特征值，系统开始由稳定状态转为发散；而根据 SSM 模型的计算结果， T_i 直到减少至小于 0.0096 时特征值才会穿越虚轴，系统才开始发散。

为研究上述 2 种模型给出的不同参数临界值，

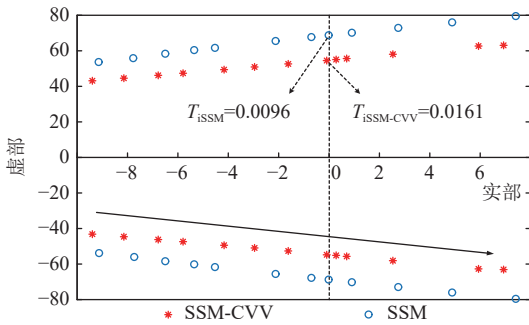


图 7 2 种模型的主导模态根轨迹

Fig. 7 Dominant modal root loci of the two models

在 PSCAD 中进行如下仿真验证：系统运行于初始状态，在 $t=5$ s 时刻设置 T_i 从 0.03 阶跃到 0.0015，电磁暂态仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知，在其他参数不变的条件下，当 T_i 从 0.03 阶跃到 0.015 后，系统由稳定状态变为振荡发散。根据 SSM-CVV 模型的计算结果， $T_i=0.0015$ 时系统的主导特征值位于虚轴右侧，系统会出现发散失稳，与仿真结果一致；而根据 SSM 模型的计算结果， $T_i=0.0015$ 时系统的主导特征值位于虚轴左侧，系统仍应处于稳定状态，与仿真结果不符。

上述分析说明，若使用不考虑电压动态过程的 SSM 模型进行系统的小信号稳定性分析，可能会在系统临界状态附近得到错误结论，在计算系统稳定运行的临界参数时出现较大偏差。因此，在研究 LCC-HVDC 系统小信号稳定问题时，应考虑电压动态过程的影响，采用本文提出的 SSM-CVV 模型得到的系统小信号稳定临界参数更准确。

4 控制器参数的稳定域

本节使用 SSM-CVV 模型，以逆变侧为例，

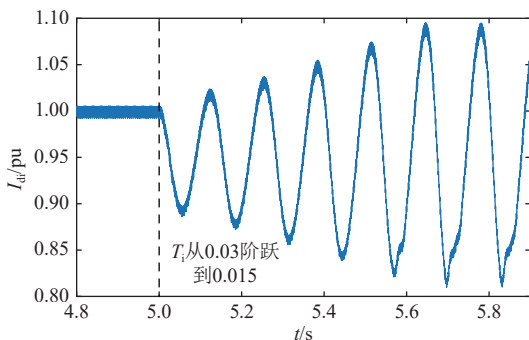


图 8 T_i 变化时直流电流 I_{di} 响应曲线

Fig. 8 Response curve of DC current I_{di} when T_i changes

计算控制器参数的稳定域。具体计算过程为：选取 2 个控制器参数为一组，保持其他参数不变，逐渐更改这 2 个参数数值，计算每一组参数组合下的特征值和阻尼比，得到最小阻尼比与参数组合的对应关系，获得参数稳定域。稳定域包含最小阻尼比的信息，最小阻尼比大于 0，系统稳定，且阻尼比数值越大，系统的小信号稳定性越强；最小阻尼比小于 0，系统将发散。

运用上述方法得到的 PI 控制器比例增益 K_{i1} 与积分时间常数 T_i 的稳定域、锁相环参数 K_{PLL} 与 PI 控制器积分时间常数 T_i 的稳定域如图 9 所示。图中黄色区域参数组合相较于蓝色区域对应的最小阻尼比更高，系统稳定性更好。图中红色线表示系统的稳定边界，即在该参数组合下系统的最小阻尼比为 0。根据参数稳定域可知，为保证系统稳定，运行过程中的参数调整不应超过图中红色边界，且参数取值在图中越靠近黄色区域，系统的稳定性越强。

为验证图 9 中参数稳定域的正确性，在 PSCAD 中进行相应的电磁暂态仿真：以图 9(a)、(b) 中 1 号点为初始状态，在 5s 时刻将控制参数切换到 2 号点，在 6s 时刻再将控制参数切换到 3 号点。以 (a) 为例，系统初始状态为 $K_i=0.4$ 、 $T_i=0.025$ ，保持其他参数不变，在 5s 时刻将 K_i 取值切换到 0.07，再在 6s 时刻将 T_i 取值切换到 0.08。对应的仿真结果如图 10 所示。

由图 9 与图 10 对比分析可知，当控制参数由 1 号点切换到 2 号点时，系统最小阻尼比减小，由正变为负，系统由稳定转为不稳定，振荡发散；当控制参数由 2 号点切换到 3 号点时，系统最小阻尼比增大变回正数，系统又恢复稳定；并且 3 号点对应的最小阻尼比大于 1 号点，3 号点对应状态的系统稳定性更好，验证了 SSM-CVV 模型计算的参数稳定域的准确性。另外，从参数稳定域中可以得知，如果只减小 PI 控制器比例增益 K_{i1} 或只增大锁相环参数 K_{PLL} ，都会导致系统稳定性下降甚至失稳，此时可以通过增大积分时间常数 T_i 提高系统稳定性。

上述分析可知，使用 SSM-CVV 模型可以计算出准确的参数稳定域，为系统控制参数的调整划定范围，有利于提高系统小信号稳定性。

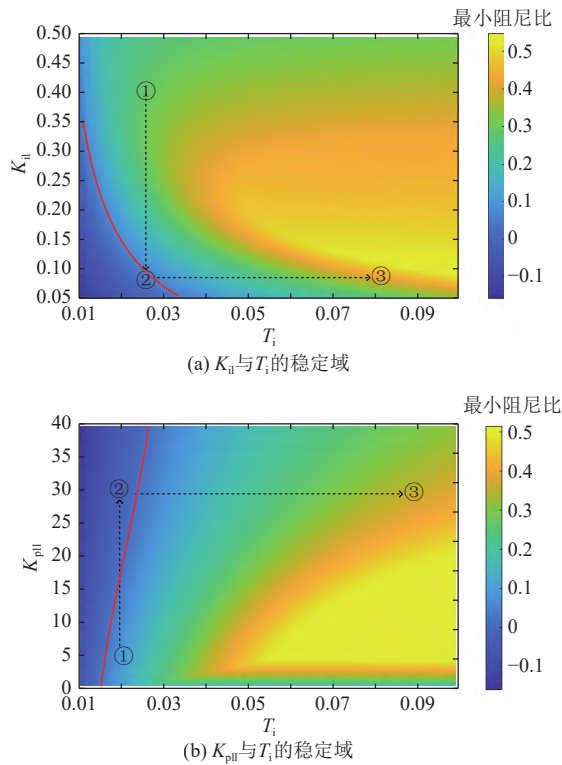


图9 控制器参数的稳定域

Fig. 9 Stability domain of controller parameter

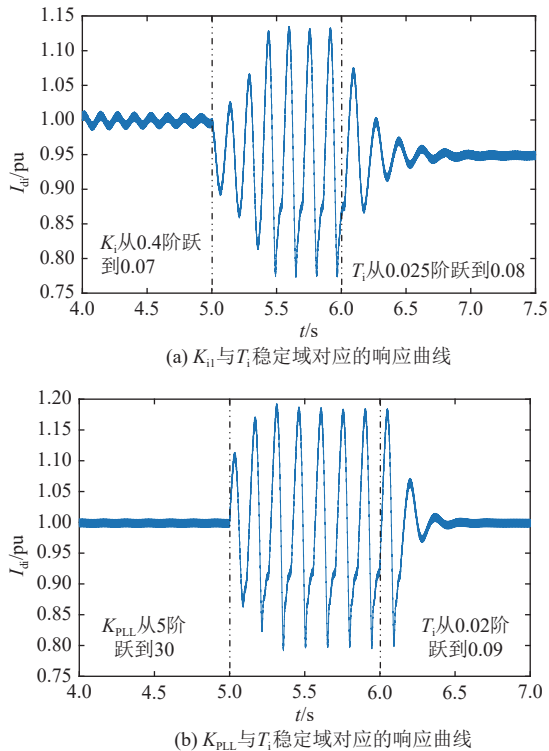


图10 参数改变对应的响应曲线

Fig. 10 Response curve corresponding to parameters change

5 结论

1) 本文方法考虑了小干扰过程中换流站交流侧电压动态过程对换流站角度关系与换相角公式的影响,通过引入新的状态方程与输出方程修正了模型,提高了模型的精度。

2) 通过与PSCAD电磁暂态仿真结果对比,本文提出的考虑电压动态过程的小信号模型能够精确模拟小干扰动态响应,在简化模型的同时以较低的模型阶数显著提高了小信号模型的准确性;相对于传统小信号模型,本文所提模型在进行小信号稳定性分析时更准确,特别是在系统临界状态附近的分析结果与实际一致。

3) 使用本文模型计算的参数稳定域揭示了系统控制参数与系统稳定性的关系,可以为系统控制参数的调整划定范围,为提高系统运行稳定性提供参考。

参考文献

- [1] 李勇. 强直弱交区域互联大电网运行控制技术与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3756-3760.
LI Yong. Technology and practice of the operation control of large power grid connected with weak AC area[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3756-3760 (in Chinese).
- [2] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Basic topology and key devices of the five-terminal DC grid[J]. CSEE Journal of Power and Energy System, 2015, 1(2): 22-35.
- [3] 王州强, 黄琦, 张昌华. 电力系统小信号模态分析方法的分析和展望[J]. 现代电力, 2008, 25(6): 1-7.
WANG Zhouqiang, HUANG Qi, ZHANG Changhua. Analysis and prospect of small-signal model analysis in power system[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(6): 1-7 (in Chinese).
- [4] 贺永杰, 向往, 周家培, 等. LCC-MMC串联型混合直流输电系统小信号建模[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1492-1506.
HE Yongjie, XIANG Wang, ZHOU Jiawei, et al. Small signal modelling of LCC-MMC series hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2021, 36(7): 1492-1506 (in Chinese).
- [5] 甄自竞, 杜文娟, 王海风. 多馈入高压直流输电系统小干扰稳定分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11): 29-36.
ZHEN Zijing, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Small signal stability analysis of multi-Infeed HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 29-36 (in Chinese).

- Chinese).
- [6] KARAWITA C, ANNAKKAGE U D. Control block diagram representation of an HVDC system for sub-synchronous frequency interaction studies[C]// Proceedings of the 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, October 19-21, 2010, London, UK: 1-5.
- [7] 付强, 杜文娟, 王海风. 交直流混联电力系统小干扰稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2829-2840,3134.
- FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Small signal stability analysis of AC/DC hybrid power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2829-2840,3134(in Chinese).
- [8] GUO Chunyi, YIN Zihan, ZHAO Chengyong, *et al.* Small-signal dynamics of hybrid LCC-VSC HVDC systems[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 98: 362-372.
- [9] GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, IRAVANI R, *et al.* Impact of phase-locked loop on small-signal dynamics of the line commutated converter-based high-voltage direct-current station[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1311-1318.
- [10] 陈威, 叶运铭, 周保荣, 等. 定电压与预测型定关断角控制对HVDC小干扰稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 98-111.
- CHEN Wei, YE Yunming, ZHOU Baorong, *et al.* Influence of constant voltage control and predictive constant extinction angle control on small-signal stability of HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 98-111(in Chinese).
- [11] 王晓辉, 陈庆军, 张彦涛, 等. 特高压直流分层接入的稳定性模态分析方法[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2869-2878.
- WANG Xiaohui, CHEN Qingjun, ZHANG Yantao, *et al.* Modal analysis on system stability of UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2869-2878(in Chinese).
- [12] KAARAWITA C, ANNAKKAGE U D. Multi-infeed HVDC interaction studies using small-signal stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 910-918.
- [13] QI Yi, ZHAO Huanfeng, FAN Shengtao, *et al.* Small signal frequency-domain model of a LCC-HVDC converter based on an infinite series-converter approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 95-106.
- [14] 周攀, 刘天琪, 王顺亮, 等. 考虑谐波耦合特性的LCC-HVDC换流站小信号建模[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 153-161.
- ZHOU Pan, LIU Tianqi, WANG Shunliang, *et al.* Small signal modeling of LCC-HVDC station with consideration of harmonic coupling characteristics[J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 153-161(in Chinese).
- [15] LU Jun, YUAN Xiaoming, HU Jiabing, *et al.* Motion equation modeling of LCC-HVDC station for analyzing DC and AC network interactions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1563-1574.
- [16] 贾庆宇, 边晓燕, 宗秀红. 基于概率法的交直流混联系统小干扰稳定性分析与改善[J]. 现代电力, 2018, 35(3): 16-23.
- JIA Qingyu, BIAN Xiaoyan, ZONG Xiuhong. Small signal stability analysis and improvement of hybrid AC/DC system based on probability method[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(3): 16-23(in Chinese).
- [17] 贺杨焯, 郑晓冬, 邵能灵, 等. 交直流混联电网LCC-HVDC换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3119-3130.
- HE Yangyang, ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, *et al.* A review of modeling methods for LCC-HVDC converter in AC/DC hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3119-3130(in Chinese).
- [18] 罗隆福, 付颖, 李勇, 等. 直流输电控制器原理及稳态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 65-69.
- LUO Longfu, FU Ying, LI Yong, *et al.* Controller of HVDC transmission system and its steady-state performance analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 65-69(in Chinese).
- [19] 舒展, 杨越, 谷铮, 等. 含锁相环的两级三相式光伏并网系统稳定性分析及控制[J]. 现代电力, 2019, 36(5): 17-23.
- SHU Zhan, YANG Yue, GU Zheng, *et al.* Oscillation modes analysis and control of two-stage three-phase photovoltaic grid-connected system with phase-locked loop[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(5): 17-23(in Chinese).
- [20] 王伟. 交直流混合系统小干扰稳定建模及模态分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

收稿日期: 2021-05-12

作者简介:

李至峪(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流系统小干扰稳定性分析, E-mail: lizhiyu_ncepu@163.com;
李欢(1986), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电技术, E-mail: lihuan3@csg.cn;
魏伟(1979), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为柔性输电配电技术、电力电子技术, E-mail: weiwei@csg.cn;
刘崇茹(1977), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 通信作者, 研究方向为交直流混合系统分析与仿真、运行与控制等, E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn.

现代电力, 2022, 39(3) <http://xddl.ncepu.edu.cn> E-mail:xddl@vip.163.com